

УДК 519.958

РАСЧЕТ ГАЗОДИНАМИКИ СТРУЙ ВЧ-ПЛАЗМЫ ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ

В.С. Желтухин, А.Ю. Шемахин

Аннотация

В работе приводится описание модели потока ВЧ-плазмы при давлении $P = 13.3 \div 133$ Па в переходном режиме при числе Кнудсена $8 \cdot 10^{-3} \leq Kn \leq 7 \cdot 10^{-2}$. Модель построена на основе статистического подхода. Приведены результаты расчета течения нейтральной компоненты плазмы в невозмущенном потоке и при наличии в струе образца.

Ключевые слова: математическое моделирование, ВЧ-плазма, пониженное давление, струйное течение, переходный режим, метод Монте-Карло, статистическое моделирование.

Плазма высокочастотных (ВЧ) разрядов пониженного давления ($P = 13.3 \div 133$ Па) с продувом газа эффективно применяется для модификации поверхностей материалов органической и неорганической природы [1]. Плазма, создаваемая данным видом разряда, обладает следующими свойствами: степень ионизации $10^{-4} \div 10^{-7}$, концентрация электронов $10^{15} \div 10^{19}$ м⁻³, электронная температура $1 \div 4$ эВ, температура атомов и ионов в плазменном сгустке $(3 \div 4) \cdot 10^3$ К, в плазменной струе $(3.2 \div 10) \cdot 10^2$ К [1].

Для эффективного управления технологическими параметрами плазменного воздействия необходим расчет характеристик потока плазмы с помощью адекватной математической модели. Модель плазмы ВЧ-разряда пониженного давления с расходом газа построена в работе [1]. Однако применение этой модели ограничено, поскольку в ней не в полной мере учитывается газодинамика потока.

Течение ВЧ-плазмы пониженного давления осуществляется в переходном режиме, для которого не существует устоявшихся моделей типа уравнений Навье–Стокса. Основная трудность описания физического процесса переходного течения разреженного газа состоит в необходимости согласовать представления о хаотическом блуждании молекул в молекулярном режиме и о ламинарном течении в вязкостном режиме.

В работе [2] предложена модель для решения пространственно-неоднородных нестационарных по времени задач течения газа. Она построена на основе синтеза следующих идей:

- 1) расщепление процесса на столкновения частиц в ячейках (этап I расчета) и бесстолкновительное смещение частиц (этап II расчета);
- 2) моделирование столкновений марковскими процессами.

На основе предложенной в [2] модели решен ряд задач аэрогазодинамики в двухмерной и трехмерной постановке, выявлено влияние различных параметров на аэродинамические характеристики тел и поля течения. Расчеты проводились при числе Рейнольдса Re от 0.1 до 100. Однако этот метод требует значительных затрат вычислительных ресурсов, знания физических констант в законах межмолекулярных взаимодействий и релаксационных процессов при соударениях молекул.

В работах [3, 4] предложен метод крупных частиц для решения системы уравнений газовой динамики. В нем на каждом шаге по времени производится расщепление полной системы уравнений на более простые. При этом диссипативные свойства разностной схемы метода обеспечивают вычислительную устойчивость и одновременно минимизируют аппроксимационную вязкость в классе аналогичных разностных схем. Этот метод позволяет рассчитывать как стационарные режимы путем установления, так и нестационарные течения.

В работах [5, 6] изучена возможность применения кинетически согласованных разностных схем для расчета течений умеренно разреженных газов с числом Кнудсена Kn , близким к 0.01. На основе усредненной функции распределения и введенного Больцмановского интеграла столкновений строится разностная схема [5]. Приводится пример расчета задачи о моделировании течения воздуха вблизи плоской пластины под нулевым углом атаки при $Kn = 0.04$ [6]. При числе Кнудсена, стремящемся к нулю, полученную схему можно рассматривать как схему расчета уравнений Эйлера. В результате расчетов получено, что профили скорости более крутые, чем соответствующие профили в пограничном слое, получающиеся путём решения обычных уравнений Навье–Стокса, что удовлетворительно согласуется с экспериментом [5, 6].

Метод прямого статического моделирования [7] разработан Г. Бёрдом и успешно применяется для широкого класса задач, в том числе и для расчета течения газа в переходном режиме. Метод Бёрда основан на кинетических уравнениях Больцмана. Модифицированный подход Бёрда, использующий метод крупных частиц и разбиение по ячейкам, в которых происходят процессы столкновения и передачи энергии, а размер ячейки подбирается в зависимости от длины свободного пробега, хорошо описывает газодинамические процессы в переходном режиме.

Струя ВЧ-плазмы пониженного давления отличается от потока нейтрального газа тем, что она является «паразитным» разрядом, горящим между колпаком вакуумной камеры и верхним витком индуктора (в индукционном разряде) либо верхним электродом (в ёмкостном разряде). Взаимодействие между заряженными частицами в разряде осуществляется дальнедействующими кулоновскими силами. В диапазоне давлений $P = 13.3 \div 133$ Па плазма термически неравновесна, степень термической неравновесности $\theta = T_e/T_a = 10 \div 100$, где T_e и T_a – электронная и газовая температуры соответственно.

Анализ и оценка характерных масштабов элементарных процессов в плазме показали, что поток ВЧ-плазмы пониженного давления обладает специфическими особенностями. Число Кнудсена Kn изменяется в следующих пределах: для электронного газа $10^{-3} \leq Kn \leq 10^{-1}$, для газа ионов $5 \cdot 10^{-4} \leq Kn \leq 5 \cdot 10^{-3}$, для нейтрального газа $8 \cdot 10^{-3} \leq Kn \leq 7 \cdot 10^{-2}$. Это означает, что течение электронного и нейтрального газов происходит в переходном режиме между течением сплошной среды и свободно-молекулярным потоком, в то время как течение ионов можно считать происходящим в режиме сплошной среды из-за влияния кулоновских сил.

В результате упругих столкновений электронов с атомами и ионами происходит нагрев тяжелых частиц. Частота упругих столкновений, при которых происходит обмен энергией между частицами плазмы, в ВЧ-разряде пониженного давления $\nu_c \sim 10^{10} - 10^{11}$ Гц. В упругих столкновениях электроны передают атомам энергию

$$\Delta E = \frac{3}{2} k_B \delta \nu_c n_e (T_e - T_a), \quad (1)$$

где $\delta = 2m_e/m_a, m_a$ – масса атома, m_e – масса электрона, k_B – постоянная Больцмана, n_e – концентрация электронов. Поэтому течение плазмы отличается от течения нейтрального газа наличием распределенного источника тепла удельной мощностью (1).

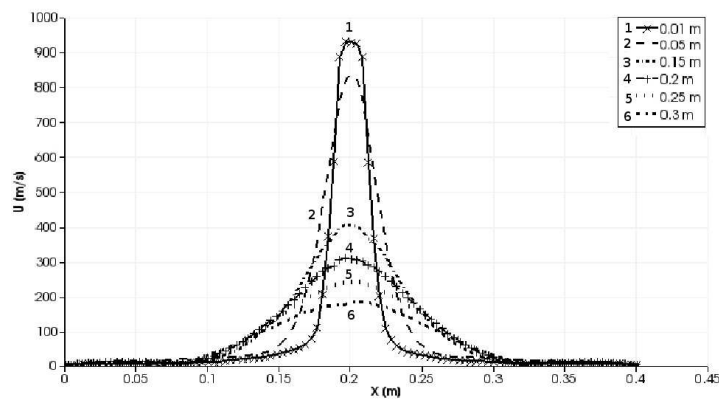


Рис. 1. Модуль скорости U в поперечном сечении невозмущенной струи в зависимости от расстояния от входного отверстия

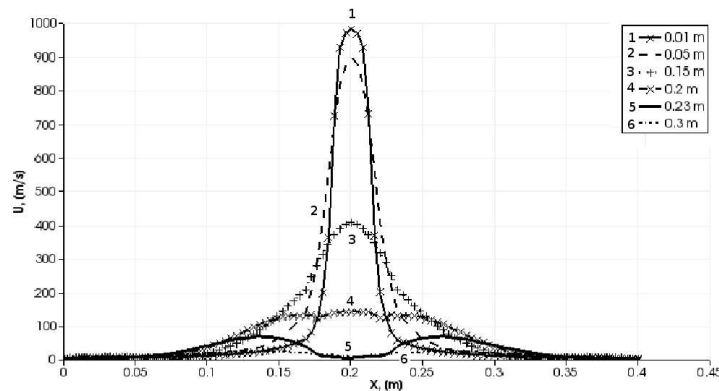


Рис. 2. Модуль скорости U в поперечном сечении струи при наличии образца в зависимости от расстояния от входного отверстия

В силу незначительности степени ионизации газа в ВЧ-разряде пониженного давления, можно пренебречь влиянием электронной и ионной компонент на характер и структуру течения.

Для расчета газодинамических характеристик нейтральной компоненты ВЧ-плазмы пониженного давления разработан метод на основе синтеза идей, предложенных Ю.М. Печатниковым и Г.А. Бёрдом [5, 7–10].

Программа расчета течения нейтральной компоненты ВЧ-плазмы пониженного давления разработана на базе пакета OpenFoam, в который включена библиотека DSMC (Direct simulation Monte-Carlo) [11]. В качестве основной расчетной единицы выбран элементарный объем, содержащий 10^{14} атомов (мезочастица). Считается, что в мезочастице все атомы обладают одинаковыми характеристиками, то есть мезочастица представляет весь ансамбль атомов выбранного элементарного объема.

Алгоритм метода DSMC основан на уравнении Больцмана и состоит из следующих основных этапов:

- 1) разбиение геометрии расчетной области на ячейки заданного объема;
- 2) генерация мезочастиц на основе распределения Максвелла и соответствующих начальных и граничных условий в ячейках расчетной области;
- 3) расчет новых скоростей и направлений движения мезочастиц на основе модели случайных столкновений;

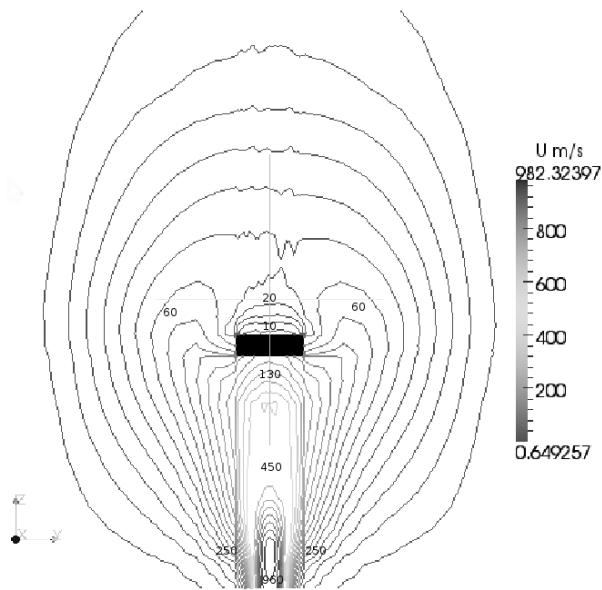


Рис. 3. Изолинии модуля скорости U в модели обтекания образца

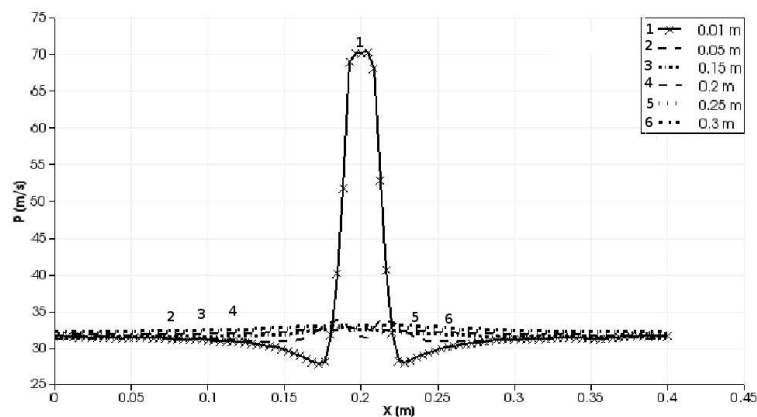


Рис. 4. Распределение давления P в поперечном сечении невозмущенной струи в зависимости от расстояния от входного отверстия

4) сдвиг мезочастиц в соответствии с их скоростями и шагом по времени, фиксация мезочастиц в новых ячейках;

5) выход из алгоритма по истечению расчетного времени, иначе переход к этапу 2.

Созданная программа рассчитывает газодинамику невозмущенной струи ВЧ-плазмы пониженного давления и процесса обтекания образца.

Расчет проводился для модели вакуумной камеры радиусом $R = 0.2$ м, радиусом входного отверстия $r = 0.012$ м и длиной камеры $L = 0.5$ м. Цилиндрический образец имел размеры $R_b = 0.03$ м, $L_b = 0.02$ м и располагался по центру потока на расстоянии $L_{tb} = 0.2$ м от входного отверстия. Плоскость образца перпендикулярна потоку.

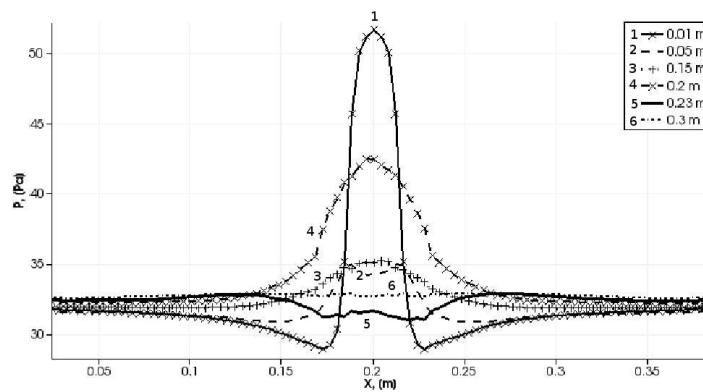


Рис. 5. Распределение давления P в поперечном сечении струи при наличии образца в зависимости от расстояния от входного отверстия

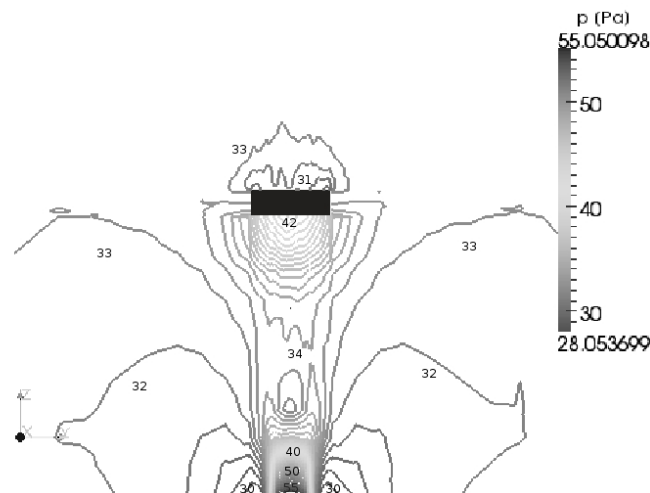


Рис. 6. Изолинии давления P в модели обтекания образца

Через входное отверстие вакуумной камеры диаметром $d = 0.024$ м втекает поток плазмы рабочего газа (аргон) с давлением на входе в диапазоне $P_{\text{inlet}} = 35 \div 65$ Па, температурой $T_{\text{inlet}} = 400 \div 600$ К, скоростью потока $V_{\text{inlet}} = 700 \div 1000$ м/с и электронной температурой $T_e = 40000$ К. Расход газа составил $G \sim 0.12 - 0.24$ г/с, степень ионизации в камере $\Delta_n = 10^{-4}$, начальное давление в камере $P_0 = 3.5 \div 6.5$ Па.

Проведены расчеты невозмущенного потока ВЧ-плазмы пониженного давления и потока, обтекающего помещенный в него образец. Расчеты показали, что время установления течения до стационарного состояния при данных условиях составило порядка 10^{-2} с.

На рис. 1–9 представлены результаты расчетов при расходе плазмообразующего газа $G = 0.24$ г/с. Температура на входе в камеру $T_{\text{inlet}} = 500$ К, скорость потока на входе в камеру $V_{\text{inlet}} = 1000$ м/с. Из рис. 1 видно, что в невозмущенной струе профиль поперечного сечения скорости имеет колоколообразную форму, причем с удалением от входного отверстия высота «колокола» (значение скорости по оси потока) уменьшается, а основание увеличивается, то есть струя расши-

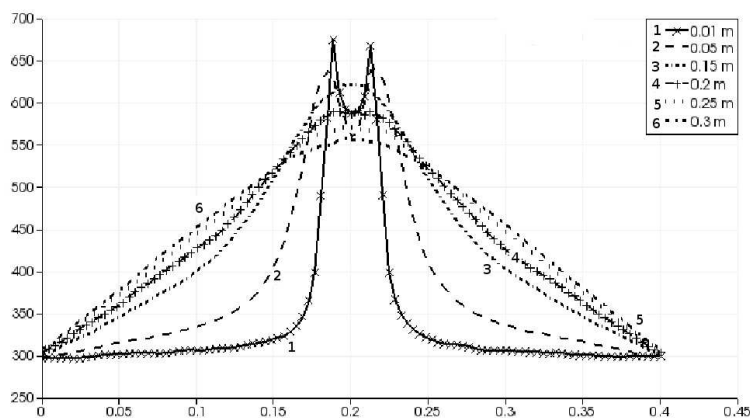


Рис. 7. Температура T в поперечном сечении невозмущенной струи в зависимости от расстояния от входного отверстия

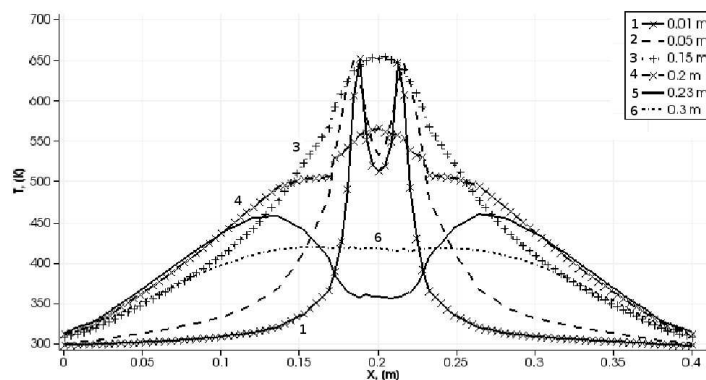


Рис. 8. Температура T в поперечном сечении струи при наличии образца в зависимости от расстояния от входного отверстия

ряется. Из рис. 2. видно, что в модели потока с образцом скорость убывает при приближении потока газа к телу, а далее вокруг тела становится заметно больше, чем в области столкновения потока с плоскостью образца (кривые 4, 5), что соответствует экспериментальной картине движения газа. На рис. 3 представлены изолинии скорости для модели с образцом.

На рис. 4 представлено распределение давления в поперечном сечении потока. Из рисунка видно, что профили давления в невозмущенной струе – колоколообразные, за исключением профиля в начале струи (кривая 1). На входе вокруг струи создается зона разрежения. Это вызвано, по-видимому, эффектом «подсоса» окружающего газа в струю. Для невозмущенного течения видно, что давление быстро падает и выравнивается уже на небольшом удалении (около 0.05 м) от входного отверстия (начиная с кривой 2).

На рис. 5 видно, что при помещении в струю образца давление на удалении 0.05 ÷ 0.15 м от входного отверстия сначала падает (кривые 2, 3), затем при подходе газа к образцу нарастает (кривая 4), что связано с торможением потока. За образцом создается область пониженного давления, а затем оно выравнивается, как и в модели без образца. Более наглядно этот процесс виден на рис. 6.

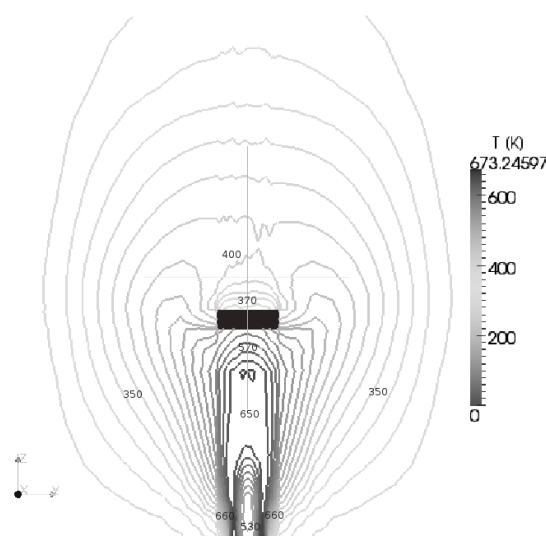


Рис. 9. Изолинии температуры T в модели обтекания образца

На рис. 7–9 представлены профили и изолинии температуры. Из рис. 7 видно, что в начале потока максимальное значение температуры создается на периферии струи, а минимум температуры достигается в центре (кривые 1, 2). Температура в поперечном сечении быстро падает при удалении от струи. Нагрев газа на периферии струи вызван, по-видимому, резким торможением молекул струи газа при столкновении с неподвижным газом в камере. Профили температуры становятся колоколообразными на расстоянии 0.15 м от входного отверстия вакуумной камеры, потом плавно уменьшаются с удалением от струи, при этом выравнивание температуры в поперечном сечении не происходит. На рис. 9 представлены изолинии температуры в модели с образцом.

Таким образом, построена модель течения квазинейтральной компоненты ВЧ-плазмы пониженного давления при числе Кнудсена $8 \cdot 10^{-3} \leq \text{Kn} \leq 7 \cdot 10^{-2}$. Установлены основные закономерности течения в невозмущенной струе и струе с образцом.

Summary

V.S. Zheltukhin, A.Yu. Shemakhin. Calculation of Gas Dynamics of Streams of a Radio-Frequency Plasma at Low Pressure.

This work describes a model of the RF plasma flow in a transient mode at a pressure of $P = 13.3\text{--}133$ Pa with a Knudsen number in a range of $8 \cdot 10^{-3} \leq \text{Kn} \leq 7 \cdot 10^{-2}$. The model is built using the statistical approach. The results of calculations of the plasma neutral component flow in an undisturbed stream and at specimen circumfluence are presented.

Key words: mathematical modeling, RF plasma, low pressure, stream flow, transient mode, Monte-Carlo method, statistical modeling.

Литература

1. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Сагбиев И.Р., Шаехов М.Ф. Модификация нанослоев в высокочастотной плазме пониженного давления. – Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2007. – 356 с.

2. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. – М.: Наука, 1984. – 518 с.
3. Дулов В.Г., Лукьянов Г.А. Газодинамика процессов истечения. – М.: Наука, 1984. – 234 с.
4. Лукьянов Г.А. Сверхзвуковые струи плазмы. – Л.: Машиностроение, 1985. – 264 с.
5. Печатников Ю.М. Современные методы расчета характеристик вакуумных агрегатов для среднего вакуума (Обзор) // Вакуум. техн. и технол. – 2002. – Т. 12, № 4. – С. 227–234.
6. Абалакин И.В., Четверушкин Б.Н. Применение кинетически-согласованных разностных схем для моделирования течений умеренно разреженных газов // Матем. моделирование. – 1992. – Т. 4, № 11. – С. 19–35.
7. Бёрд Г.А. Молекулярная газовая динамика. – М.: Мир, 1981. – 319 с.
8. Печатников Ю.М. Вероятностная модель течения разреженного газа // Инж. физика. – 2003. – № 2. – С.32–36
9. Печатников Ю.М. Современные модели и методы моделирования переходного течения разреженных газов // Журн. техн. физики. – 2003. – Вып. 12. – С.20–25.
10. Печатников Ю.М. Физические явления и процессы переходного течения разреженного газа // Прикл. физика. – 2004. – № 2. – С. 19–25.
11. OpenFOAM Foundation. – URL: <http://www.openfoam.org/>.

Поступила в редакцию
10.08.11

Желтухин Виктор Семенович – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой математической статистики Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: vzheltukhin@gmail.com

Шемахин Александр Юрьевич – ассистент, аспирант кафедры математической статистики Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: shemakhin@gmail.com